КРИОСФЕРА ЗЕМЛИ
НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ

Криосфера Земли, 2017, т. XXI, № 4, с. 29–33 **http://www.izdatgeo.ru**

ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ В КРИОСФЕРЕ

УДК 536.2, 550.8 DOI: 10.21782/KZ1560-7496-2017-4(29-33)

ОСОБЕННОСТИ ПОГРУЖЕНИЯ РАДИОИЗОТОПНЫХ УСТРОЙСТВ В ТОЛЩУ ЛЬДА

Р.В. Арутюнян, А.М. Шведов

Институт проблем безопасного развития атомной энергетики РАН,
115191, Москва, ул. Большая Тульская, 52, Россия; arut@ibrae.ac.ru, sham@ibrae.ac.ru

Работа посвящена анализу характеристик погружения радиоизотопных устройств в толщу льда при реализации различных теплофизических механизмов передачи энергии, выделяемой при радиоактивном распаде содержащихся в устройстве радионуклидов. На примере устройств на основе радионуклидов ^{90}Sr, ^{137}Cs и ^{60}Co рассмотрены особенности передачи энергии окружающему льду посредством механизмов теплопроводности и прямого нагрева излучением. Для модели устройства в виде шара выполнены оценки параметров погружения в лед, включая пороговую мощность тепловыделения для обеспечения плавления льда и скорость погружения, зависящую от мощности тепловыделения и размеров устройства.

Исследования льда, самопогружение, радиоизотопы, плавление льда, механизмы передачи тепла, теплопроводность, прямой нагрев гамма-излучением

FEATURES OF SINKING OF RADIOISOTOPE DEVICES IN ICE STRATUM

R.V. Arutyunyan, A.M. Shvedov

The Nuclear Safety Institute, RAS,
52, B. Tulskaya str., Moscow, 115191, Russia; arut@ibrae.ac.ru, sham@ibrae.ac.ru

Sinking of radioisotope devices in ice due to different thermal mechanisms of energy transfer is analyzed in this work. Features of heat transfer from the device to the surrounding ice by thermal conduction and direct heating by gamma radiation are considered by the example of sinking devices with radionuclides ^{90}Sr, ^{137}Cs and ^{60}Co. For the device model in the shape of a sphere containing nuclides listed above, the sinking parameters including the threshold heat power required for melting of ice and the descent velocity depending on heat power and the size of the sphere have been assessed.

Ice research, self-sinking, radioisotopes, ice melting, heat transfer mechanisms, thermal conduction, direct heating due to gamma radiation

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время при проведении исследований природных льдов применяются различные методы измерений, включая отбор проб, бурение, а также широко используются возможности аэросъемки и космической съемки. Как известно, мощность ледяного покрова на Земле может достигать 4700 м (ледяной покров Антарктиды) [*Войтковский, 1999*]. Применение способа погружения в горные породы на основе использования энергии излучения радионуклидов [*Кащеев и др., 1992; Способ..., 2014; Устройство..., 2014; Устройство..., 2016; Logan, 1974; Gibb, 1999*] для осуществления погружения в лед позволит проникать в толщи льда на глубины до 4 км и более. Совместно с соответствующим измерительным оборудованием данный способ может быть использован для исследования труднодоступных областей в толщах льда, находящихся на больших глубинах, и получения информации о физико-химических характеристиках льда и их распределении по глубине. Такие измерения могут проводиться локально на отдельных участках исследуемой территории, в частности, для уточнения данных, полученных другими методами.

Способ самозахоронения радиоактивных отходов (РАО) атомной энергетики за счет собственного тепловыделения в горных породах, таких как гранит, базальт и др., рассмотрен в работах [*Кащеев и др., 1992; Logan, 1974; Gibb, 1999; Gibb, Ojovan, 2005*]. Предполагается размещение подле-

© Р.В. Арутюнян, А.М. Шведов, 2017

жащих захоронению РАО в специальную капсулу. Энергия, выделяемая при радиоактивном распаде содержащихся в РАО радионуклидов, используется для проплавления окружающих пород. Вытесняя под действием силы тяжести образующийся расплав, капсула опускается в глубь породы. С использованием данного способа потенциально возможно погружение в глубинные слои литосферы вплоть до мантии.

В патентах [*Способ..., 2014; Устройство..., 2014; Устройство..., 2016*] предложены способы и устройства погружения в горные породы на основе тепловыделяющих элементов с отдельными радионуклидами (в том числе из состава РАО), обладающими необходимыми характеристиками для обеспечения тепловыделения в течение длительного периода погружения устройства. Такие устройства погружения могут служить носителями полезной нагрузки, например, измерительной аппаратуры для проведения исследований.

В зависимости от характеристик излучения радионуклидов, геометрии и материала устройства могут быть различные механизмы передачи выделяемой энергии окружающей среде с целью ее проплавления. В приведенных выше работах и патентах предполагается, что передача тепла окружающему материалу осуществляется преимущественно за счет теплопроводности, так как бóльшая часть излучения поглощается внутри устройства или контейнера, используемого для погружения.

В настоящей работе рассматривается погружение в толщу льда с помощью устройства, содержащего радионуклиды, когда в качестве основного механизма передачи энергии выступает теплопроводность либо прямой нагрев льда γ-излучением. Под прямым нагревом излучением материала, в который осуществляется погружение, понимается перенос испускаемого радионуклидами излучения с его последующим поглощением этим материалом. Анализ проводится на примере погружения с использованием устройств на основе различных радионуклидов, характеристики излучения которых наряду с конструкционными особенностями устройств позволяют реализовывать указанные выше механизмы передачи энергии.

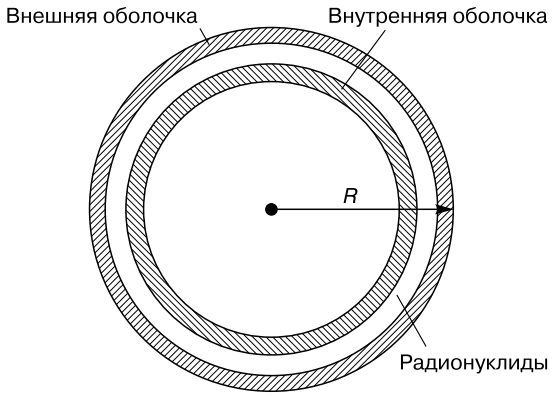

Рис. 1. Геометрия устройства для погружения в толщу льда (*R* – внешний радиус устройства).

МОДЕЛЬ УСТРОЙСТВА ДЛЯ ПОГРУЖЕНИЯ В ТОЛЩУ ЛЬДА

В рамках исследования предполагается, что погружение в толщу льда производится с помощью устройства, геометрия которого представлена на рис. 1. Радионуклиды, обеспечивающие тепловыделение для проплавления льда, размещаются в шаровом слое, заключенном между внутренней и внешней оболочками, выполненными из стали или сплавов на основе тугоплавких металлов Mo, Nb, Ta и др. Для проведения оценок принимается, что толщина внутренней и внешней оболочек составляет 3 мм; масса радионуклида в шаровом слое определяется требуемой мощностью тепловыделения.

Среди радионуклидов, содержащихся в РАО атомной энергетики, а также применяемых в промышленности и медицине, можно выделить ^{60}Co, ^{90}Sr (с дочерним нуклидом ^{90}Y) и ^{137}Cs (с дочерним нуклидом ^{137m}Ba), характеристики которых представлены в таблице [*Бабичев и др., 1991; ICRP..., 2008*]. Значения удельного энерговыделения в таблице приведены в предположении равновесия материнских нуклидов с их дочерними продуктами распада. Благодаря достаточно высоким значениям выхода энергии на один акт распада для этих радионуклидов характерны высокие мощности энерговыделения. Промежуточные по сравнению с другими радионуклидами значения периода полураспада позволяют поддерживать необходимую мощность энерговыделения на протяжении длительного периода времени. Принимая во внимание указанные особенности, далее в качестве источников тепловыделения в устройствах для погружения в лед будем рассматривать радионуклиды, приведенные в таблице.

Удельное энерговыделение радионуклидов, содержащихся в РАО

Радионуклиды	Плотность, г/см^3	Период полураспада, лет	Удельное энерговыделение	
			Вт/г	Дж/г
^{60}Co	8.9	5.27	16.77	$4.0\cdot10^9$
^{90}Sr	2.63	28.8	0.92	$1.2\cdot10^9$
^{137}Cs	3.97	30.2	0.23	$3.2\cdot10^8$

ХАРАКТЕРИСТИКИ ПОГРУЖЕНИЯ ПРИ РЕАЛИЗАЦИИ РАЗЛИЧНЫХ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ МЕХАНИЗМОВ

Передача энергии теплопроводностью (устройство на основе ^{90}Sr)

Экстраполированный пробег β-излучения радионуклидов ^{90}Sr и ^{90}Y (дочерний продукт распада ^{90}Sr), соответствующий максимальной энергии испускаемого излучения 2.28 МэВ, в материале оболочки устройства погружения составляет не более нескольких миллиметров. При использовании данных радионуклидов в качестве источника тепловыделения следует ожидать, что практически вся выделяемая при радиоактивном распаде энергия поглотится внутри устройства. При этом проплавление окружающего льда будет происходить за счет передачи тепловой энергии от устройства посредством механизма теплопроводности.

Минимальное значение мощности тепловыделения $Q_{\min}$, необходимое для проплавления окружающей среды, может быть получено как [*Logan, 1974*]

$$Q_{\min} = 4\pi k R\left(T_{\text{пл}} - T_{\text{ср}}\right), \qquad (1)$$

где R – внешний радиус устройства погружения; k – теплопроводность окружающей среды (в данном случае льда); $T_{\text{пл}}$ – температура плавления окружающей среды; $T_{\text{ср}}$ – температура окружающей среды. Оценка (1) соответствует стационарному решению уравнения теплопроводности. Зависимость минимально необходимого для проплавления льда тепловыделения от размера устройства $Q_{\min}(R)$ приведена на рис. 2.

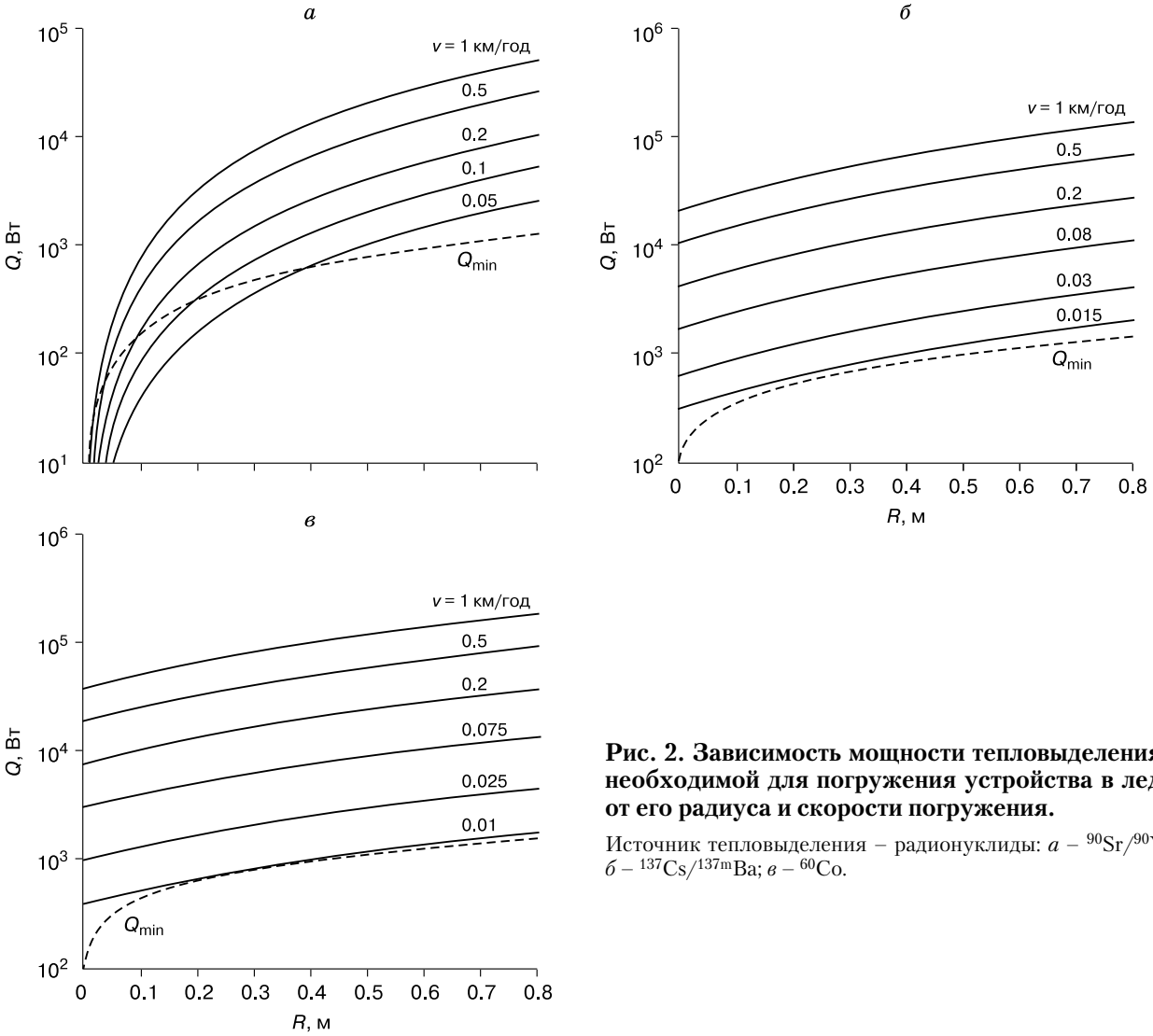

Рис. 2. Зависимость мощности тепловыделения, необходимой для погружения устройства в лед, от его радиуса и скорости погружения.

Источник тепловыделения – радионуклиды: *а* – ^{90}Sr/^{90}Y; *б* – ^{137}Cs/^{137m}Ba; *в* – ^{60}Co.

При $Q >> Q_{\min}$ оценка мощности тепловыделения, необходимой для погружения со скоростью v [*Арутюнян и др., 2010; Chen et al., 2013*], может быть получена из выражения

$$Q = 2v\pi R^2\left[C\left(T_{\text{пл}} - T_{\text{ср}}\right) + \lambda_{\text{пл}}\rho\right], \qquad (2)$$

где C, $\lambda_{\text{пл}}$, ρ – объемная теплоемкость, удельная теплота плавления и плотность льда. На рис. 2, *а* приведены зависимости Q от внешнего радиуса устройства, построенные на основе (2), при различных значениях скорости погружения.

Значения констант в расчетах задавались на основе [*Бабичев и др., 1991; Войтковский, 1999; Yen, 1981*]: $\rho = 0.917\cdot10^3$ кг/м^3, $C = 1.77\cdot10^6$ Дж/(м^3·К), $\lambda_{\text{пл}} = 334.056\cdot10^3$ Дж/кг, $k = 2.1$ Вт/(м·К), $T_{\text{пл}} = 0$ °С; $T_{\text{лед}} = -60$ °С.

На рис. 2, *а* видно, что для достижения скорости 1 км/год необходима мощность тепловыделения около $5\cdot10^3$ Вт. Данное значение мощности соответствует активности ^{90}Sr, равной $2.8\cdot10^{16}$ Бк.

Прямой нагрев льда излучением (устройство на основе ^{137}Cs и ^{60}Co)

Радионуклиды ^{137}Cs и ^{60}Co являются источниками γ-излучения. При радиоактивном распаде ^{137}Cs испускается излучение с энергией 0.662 МэВ и средним числом γ-квантов на один акт распада 0.85 (излучение принадлежит радионуклиду ^{137m}Ba, дочернему продукту распада ^{137}Cs). Радионуклид ^{60}Co обладает γ-излучением с энергиями 1.173 и 1.332 МэВ, среднее число γ-квантов на распад составляет 0.999 и 1.0 соответственно. При использовании этих радионуклидов в качестве источников тепловыделения, вследствие высокой энергии и, соответственно, высокой проникающей способности испускаемых γ-квантов, бóльшая часть излучения будет поглощаться за пределами устройства в окружающем льду. Таким образом, в данном случае можно говорить о реализации механизма прямого нагрева льда излучением как основного способа передачи выделяемой при распаде энергии. Оценки характерных размеров области поглощения энергии γ-излучения δ_E во льду (область, соответствующая поглощению 90 % выделяемой источником энергии), выполненные авторами с помощью расчетов методом Монте-Карло, составляют: $\delta_E = 51$ см для излучения ^{137}Cs, $\delta_E = 69$ см для излучения ^{60}Co.

Для оценок параметров погружения с применением радионуклидов ^{137}Cs и ^{60}Co пространственное распределение мощности тепловыделения во льду вследствие поглощения γ-излучения (область: $R \leqslant r \leqslant R_E$, где $R_E = R + \delta_E$) приближенно представлялось в виде

$$q(r) = \frac{a}{r^2} + b, \qquad (3)$$

где константы a, b определялись из условия нормировки на полную мощность тепловыделения $\int_R^{R_E}\left(\frac{a}{r^2}+b\right)4\pi r^2 dr = Q$ и условия равенства нулю объемного тепловыделения при $r = R_E$: $\frac{a}{R_E^2} + b = 0$. Предполагалось, что в области $R_E \leqslant r \leqslant \infty$ источник тепловыделения отсутствует.

Минимальная мощность тепловыделения, необходимая для проплавления льда, определялась из решения стационарной системы уравнений теплопроводности с распределением мощности тепловыделения (3) в окружающем льду:

$$Q_{\min} = \frac{4\pi k\left(T_{\text{пл}} - T_{\text{ср}}\right)\left[R_E^2\left(R_E - R\right) - \left(R_E^3 - R^3\right)/3\right]}{R_E^2\ln\left(R_E/R\right) + \left(R^2 - R_E^2\right)/2}. \qquad (4)$$

Требуемая для погружения с заданной скоростью мощность тепловыделения определялась из выражения (2), где вместо размера устройства R брался радиус R_E, соответствующий поглощению большей части энергии γ-излучения.

На рис. 2, *б*, *в* приведены зависимости мощности тепловыделения от внешнего радиуса R устройства при различных значениях скорости погружения в случае использования радионуклидов ^{137}Cs и ^{60}Co как источников энергии. Как и ранее, рассматривались размеры устройства R, составляющие десятки сантиметров. На рис. 2, *б*, *в* видно, что для погружения со скоростью v = = 0.5 км/год требуется мощность тепловыделения около $5\cdot10^4$ Вт. Такое значение мощности может быть получено за счет γ-излучения ^{137}Cs с активностью $5.6\cdot10^{17}$ Бк или ^{60}Co с активностью $1.1\cdot10^{17}$ Бк.

ВЫВОДЫ

В работе рассмотрен способ погружения в толщу льда с использованием радиоизотопных устройств, когда передача тепла от устройства окружающему льду осуществляется путем теплопроводности и прямого нагрева льда излучением.

В качестве источников тепловыделения для целей данного анализа были выбраны радионуклиды ^{90}Sr, ^{137}Cs и ^{60}Co, содержащиеся в РАО атомной энергетики, промышленных и медицинских источниках излучения, обладающие высокой удельной мощностью энерговыделения и способные сохранять необходимый уровень мощности в течение длительного времени погружения устройства. Различия в характеристиках излучения данных радионуклидов обусловливают реализацию одного из двух указанных выше механизмов в качестве основного способа передачи тепла проплавляемому льду. Так как β-излучение ^{90}Sr и его дочернего продукта ^{90}Y практически полностью поглощается в конструкции устройства, передача тепловой энергии осуществляется в основном посредством теплопроводности. Благодаря высокой

проникающей способности γ-излучения ^{137}Cs и ^{60}Co основная часть излучения выходит за пределы устройства, обеспечивая прямой нагрев окружающего льда за счет поглощения излучения.

Выполненные оценки показали, что для погружения со скоростью около 1 км/год устройства на основе радионуклидов ^{90}Sr необходима активность ~10^{16} Бк, при этом для достижения данного значения скорости устройством на основе ^{137}Cs или ^{60}Co требуется активность радионуклидов, составляющая ~10^{17} Бк. Реализация механизма прямого нагрева льда γ-излучением в устройствах погружения в лед будет способствовать повышению его надежности за счет снижения температурных нагрузок на элементы устройства.

Радиоизотопные устройства на основе рассмотренных механизмов передачи тепла окружающему льду позволяют выполнять погружение в автономном режиме в течение длительного периода времени, могут служить носителями полезной нагрузки в виде измерительного оборудования и применяться для проведения широкого круга исследований в глубинных слоях льда с учетом преимуществ измерений при близком контакте с изучаемой средой.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке РФФИ (проект № 17-08-01491).

Литература

Арутюнян Р.В. Ядерное топливо в объекте “Укрытие” Чернобыльской АЭС / Р.В. Арутюнян, Л.А. Большов, А.А. Боровой и др. М., Наука, 2010, 240 с.

Arutyunyan, R.V., Bolshov, L.A., Borovoy, A.A., et al., 2010. Nuclear Fuel in the Burial Object of Chernobyl Nuclear Power Plant. Nauka, Moscow, 240 pp. (in Russian)

Бабичев А.П. Физические величины: Справ. / А.П. Бабичев, Н.А. Бабушкина, А.М. Братковский и др.; под ред. И.С. Григорьева, Е.З. Мейлихова. М., Энергоатомиздат, 1991, 1232 с.

Babichev, A.P., Babushkina, N.A., Bratkovsky, A.M., et al., 1992. Physical Values. A Manual. Edited by I.S. Grigoryev, and E.Z. Meilikhov. Energoatomizdat, Moscow, 1232 pp. (in Russian)

Войтковский К.Ф. Основы гляциологии / К.Ф. Войтковский. М., Наука, 1999, 255 с.

Voitkovsky, K.F., 1999. Foundations of Glaciology. Nauka, Moscow, 255 pp. (in Russian)

Кащеев В.А., Никифоров А.С., Полуэктов П.П. и др. К теории самозахоронения высокоактивных отходов // Атом. энергия, 1992, т. 73, вып. 3, с. 215–221.

Kashcheev, V.A., Nikiforov, A.S., Poluektov, P.P., et al., 1992. On the theory of self-burial of highly active nuclear waste. Atom. Energia, 73 (3), 215–221. (in Russian)

Способ захоронения радиоактивных отходов и тепловыделяющая капсула для его осуществления: пат. RU 2510540 C1. Рос. Федерация: МПК G21F 9/28 (2006.01) / Арутюнян Р.В., Большов Л.А., Кондратенко П.С. и др.; патентообладатель ИБРАЭ РАН. – № 2012134053/07; заявл. 09.08.12; опубл. 27.03.14, Бюл. № 9.

Arutyunyan, R.V., Bolshov, L.A., Kondratenko, P.S., et al., 2014. A method of burying radioactive waste and a heat-producing capsule used for the purpose: patent No. RU 2510540 C1, Russian Federation: MPK G21F 9/28 (2006.01), patent holder Nuclear Safety Institute, RAN No. 2012134053/07; claimed 09.08.12; published 27.03.14, bulletin No. 9.

Устройство для погружения в расплавляемых геологических породах: пат. RU 2535199 C1. Рос. Федерация: МПК G21F 9/24 (2006.01) / Арутюнян Р.В.; патентообладатель ИБРАЭ РАН. – № 2013133421/07; заявл. 18.07.13; опубл. 10.12.14, Бюл. № 34.

Arutyunyan, R.V., 2014. A device for sinking into melted rocks: patent No. RU 2535199 C1, Russian Federation: MPK G21F 9/24 (2006.01) / patent holder Nuclear Safety Institute, RAN No. 2013133421/07; claimed 18.07.13; published 10.12.14, bulletin No. 34.

Устройство для погружения в расплавляемых геологических породах: пат. RU 2577517 C1. Рос. Федерация: МПК G21F 9/24 (2006.01) / Арутюнян Р.В.; патентообладатель ИБРАЭ РАН. – № 2015108133/07; заявл. 10.03.15; опубл. 20.03.16, Бюл. № 8.

Arutyunyan, R.V., 2016. A device for sinking into melted rocks: patent No. RU 2577517 C1. Russian Federation: Russian Federation MPK G21F 9/24 (2006.01); patent holder Nuclear Safety Institute, RAN 2015108133/07; claimed 10.03.15; published 20.03.16, bulletin No. 8.

Chen, W., Hao, J., Chen, Z. A Study of Self-Burial of a Radioactive Waste Container by Deep Rock Melting // Science and Technology of Nuclear Installations, 2013, 6 p.

Gibb, F. High-temperature, very deep, geological disposal: a safer alternative for high-level radioactive waste? // Waste Management, 1999, vol. 19, p. 207–211.

Gibb, F., Ojovan, M. Feasibility of very deep self-disposal for sealed radioactive sources // WM’05 Conference (February 27 – March 3, 2005), Tucson, Arizona, USA, 2005, 10 p.

ICRP Publication 107: Nuclear Decay Data for Dosimetric Calculations // Ann. ICRP, 2008, vol. 38, iss. 3, 96 p.

Logan, S.E. Deep self-burial of radioactive wastes by rock-melting capsules // Nuclear Technol., 1974, vol. 21, p. 111–124.

Yen, Y.-C. Review of thermal properties of snow, ice and sea ice // CRREL Rep. 81-10, Hanover, New Hampshire, USA, 1981, 27 p. (Cold Reg. Res. and Eng. Laboratory).

Поступила в редакцию
15 января 2017 г.